

## Vibration Characteristics of Integer-Slot Distributed Winding Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Tooth Modulation

Byeong-Choel Bae, Yun-Jae Won, and Myung-Seop Lim\*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, South Korea

(Received 9 September 2025, Received in final form 21 October 2025, Accepted 24 October 2025)

This study investigates the vibration characteristics of integer-slot distributed winding permanent magnet synchronous motors (PMSMs) by considering the tooth modulation effect of slot harmonics. While conventional analyses mainly emphasize the influence of the lowest-order force components, the proposed approach demonstrates that slot-order force harmonics can be modulated into zeroth-order forces through the tooth modulation effect. To validate this mechanism, electromagnetic and modal analyses were conducted on a 12-pole 72-slot concentrated flux PMSM. The results indicate that under rated operating conditions, vibration is dominated by the  $2f_e$  component; however, at higher speeds, the  $(s/p)f_e$  component coincides with the zeroth-mode natural frequency, causing the zeroth-order force to dominate the vibration response. These findings reveal a previously overlooked source of vibration in distributed winding PMSMs and highlight the necessity of considering both the lowest-order and zeroth-order forces for low-noise and low-vibration motor design.

**Keywords :** permanent magnet synchronous motor, distributed winding, slot harmonics, tooth modulation, vibration

## 정수 슬롯 분포권 영구자석 동기모터의 치변조 기반 진동 특성 분석

배병철 · 원윤재 · 임명섭\*

한양대학교 미래자동차공학과, 서울시 왕십리로 222, 04763

(2025년 9월 9일 받음, 2025년 10월 21일 최종수정본 받음, 2025년 10월 24일 게재확정)

본 연구에서는 정수 슬롯 분포권 영구자석 동기모터(PMSM)의 진동 특성을 슬롯 고조파에 의한 치변조 효과를 고려하여 분석하였다. 기존 연구가 주로 최저차 force order의 영향을 강조한 것과 달리, 본 연구에서는 슬롯 차수 force order가 치변조 효과에 의해 0차 force order로 변조되어 모터 진동에 중요한 영향을 줄 수 있음을 규명하였다. 이를 검증하기 위해 12극 72슬롯 자속집중형 PMSM을 대상으로 전자계 및 모달 해석을 수행하였다. 해석 결과, 정격 조건에서는  $2f_e$  성분이 지배적이었으나, 고속 운전 시  $(s/p)f_e$  성분이 0 모드 공진 주파수와 일치하여 0차 force order가 진동 특성을 지배하는 현상을 확인하였다. 이러한 결과는 분포권 PMSM의 진동 원인에 대한 새로운 시각을 제시하며, 향후 저소음·저진동 모터 설계를 위해 최저차 성분뿐 아니라 0 차 force order까지 함께 고려해야 함을 보여준다.

**주제어 :** 영구자석 동기모터, 분포권, 슬롯 고조파, 치변조 효과, 진동

### I. 서 론

영구자석 동기모터(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 높은 토크 밀도와 우수한 효율 특성으로 인해 전기차, 가전, 산업용 구동 장치 등 다양한 응용 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 최근 친환경 교통수단과 고효율 에너지 시

스템에 대한 수요가 급증함에 따라 PMSM의 활용도는 지속적으로 확대되고 있으며, 이에 따라 모터 성능뿐만 아니라 진동 및 소음 특성 또한 중요한 품질 지표로 부각되고 있다. 특히 산업 현장과 차량 응용에서 진동 및 소음은 사용자 경험과 제품 신뢰성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구는 오랜 기간 동안 활발히 이루어져 왔다[1-3].

모터의 진동은 크게 공기역학적, 기계적, 전자기적 요인에 의해 발생할 수 있는데, 소형 및 중형급 PMSM에서는 전자기적 가진력이 주요 원인으로 알려져 있다[4]. 전자기적 가진력은 모터 극 수와 슬롯 수에 의해 정의되는 force order(힘의 공간적 차수)로 표현되며, 일반적으로 차수가 낮을수록 진동 및 변형에 더 큰 영향을 미친다. 따라서 기존의 분포된 모터의 진동관련 연구들은 최저차 force order가 모터 진동에 미치는 영향을 중점적으로 분석해왔으며 0차 force order는 일반적으로 무시되어왔다. 그러나 정수 슬롯을 갖는 분포권 모터의 경우(예: 8극 48슬롯, 12극 72슬롯) 극 수와 슬롯 수의 최대공약수가 커지게 되며, 이에 따라 최저차 force order가 높아지고 그로 인한 진동 영향은 상대적으로 작아지는 한계가 존재한다.

이러한 배경에서 최근 연구들은 분포권 모터에서 기존의 분석이 간과해온 0차 force order의 중요성에 주목하고 있다 [1,2]. 특히 분포된 전자기력을 치중심을 기준으로 적분하여 구하는 집중힘을 고려할 경우, 0차 force order가 모터 진동에 미치는 영향은 더욱 두드러지게 된다. 또한 슬롯 주파수에서 발생하는 슬롯 차수 force order는 치변조 효과(tooth modulation effect)에 의해 0차 force order로 변조될 수 있으며, 이는 기존 연구에서 예상하지 못한 새로운 진동 원인으로 작용할 가능성이 크다. 최근 일부 연구에서는 이러한 치변조 효과가 정수 슬롯 PMSM의 진동과 소음 특성에 중요한 영향을 미친다는 사실을 연구한 바 있다[3]. 하지만 기존 연구들은 영구자석 매입형 PMSM에만 국한되어 있기 때문에 다양한 모터 토플로지에서도 적용이 되는지 연구를 확장할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 자속집중형 12극 72슬롯 분포권 PMSM을 대상으로 슬롯 고조파와 치변조 효과가 0차 force

order 진동에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 이를 최저차 force order 성분과 비교하여 고찰하였다. 본 연구는 분포권 모터에서의 진동 원인을 새롭게 규명함과 동시에, PMSM의 저소음·저진동 설계를 위한 기초적 설계 지침을 제시하는데 목적이 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 영구자석 동기모터의 전자기적 가진원을 이론적으로 정리하고, 제3장에서는 집중힘을 통해 나타나는 치변조 효과를 설명한다. 이어 제4장에서는 실제 대상 모터에 치변조 효과가 미치는 영향을 전자계 해석 및 모달 해석을 통해 분석하고, 마지막으로 제5장에서 결론을 제시한다.

## II. 영구자석 동기모터의 전자기적 가진원

모터에서 진동 및 소음을 유발하는 가진원은 일반적으로 공기역학적 요인, 기계적 요인, 그리고 전자기적 요인으로 구분할 수 있다. 그 중 전자기적 가진원은 소형 및 중형급 모터의 주요 가진원이며, 따라서 전자기적 가진원에 대한 분석은 진동 특성을 이해하는 데 필수적이다[4].

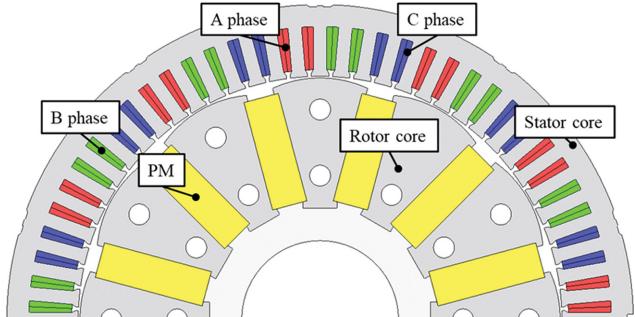


Fig. 1. (Color online) Concentrated flux 12-pole 72-slot target model geometry.

Table I. Specification of target motor.

	Specification	Unit	Value	Note
Power	DC voltage	V <sub>dc</sub>	380	
	Maximum current	A <sub>rms</sub>	44	
Motor performance	Maximum power	kW	22	
	Maximum torque	Nm	137.1	
	Base speed	rpm	1,800	
Number of poles / slots	Maximum speed	rpm	3,600	
		-	12 / 72	
Geometry	Airgap length	mm	0.8	
	Outer diameter of stator	mm	300	
	Outer diameter of rotor	mm	230	
	Stack length	mm	200	
Material	Residual flux density of PM	T	0.41	@ 60°C
	Core material	-	35PN230	

전자기적 가진원은 주로 공극 자속밀도의 분포와 변동에서 기인한다. Maxwell stress tensor 식을 기반으로 PMSM의 전자기 응력을 수식적으로 표현할 수 있으며, 이를 통해 모터에 작용하는 force order와 주파수 성분을 분석할 수 있다. 본 논문의 대상 모터 형상 및 사양은 Fig. 1과 Table I에 나타내었다.

영구자석 동기모터의 공극 자속밀도는 영구자석에 의한 성분과 전기자가 만들어 내는 회전자계에 의한 성분으로 구성되어 있다. 고정자 슬롯 효과에 의한 영향은 공극 비페미언스로 반영할 수 있다. 포화효과를 무시한다고 가정하면 부하시 영구자석 동기모터의 방사방향 공극 자속밀도,  $B_r$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_r = (B_{r\_PM} + B_{r\_Arm})\lambda_g \quad (1)$$

여기서  $B_{r\_PM}$ ,  $B_{r\_Arm}$ 은 각각 슬롯이 없는 고정자에서의 영구자석 및 전기자에 의한 방사 방향 공극 자속밀도,  $\lambda_g$ 는 슬롯 효과를 반영한 공극 비페미언스이다. 푸리에 급수를 이용하여  $B_{r\_PM}$ ,  $B_{r\_Arm}$ , 그리고  $\lambda_g$ 를 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$B_{r\_PM} = \sum_{\mu} B_{\mu} \cos(\mu p \theta - \mu p \omega_r t) \quad (2)$$

$$B_{r\_Arm} = \sum_{v} B_v \cos(s_v v N_t \theta - p \omega_r t + \phi_v) \quad (3)$$

$$\lambda_g = \lambda_0 + \sum_k \lambda_k \cos(k s \theta) \quad (4)$$

여기서  $B_{\mu}$ ,  $B_v$ ,  $\lambda_k$ 는 각각  $\mu$ 차 고조파의 영구자석 공극 자속밀도,  $v$ 차 고조파 전기자 공극 자속밀도,  $k$ 차 고조파의 공극 비페미언스이고,  $\lambda_k$ 는 공극 비페미언스의 옵셋 성분의 크기,  $p$ 는 극 쌍수,  $\theta$ 는 기계적 각도,  $\omega_r$ 는 모터의 기계 각속도,  $t$ 는 시간,  $N_t$ 는 모터의 공간적 주기로써 극 수와 슬롯수의 최대공약수로 나타내어지게되며,  $\phi_v$ 는  $v$ 차 고조파 전기자 자속밀도의 위상,  $s$ 는 슬롯 수,  $s_v$ 는 전기자 자속밀도의 회전방향을 나타내며 1이면 정방향을, -1이면 역방향을 나타낸다. 본 논문에서는 인가 전류의 기본파 성분만을 고려하여 전기자 공극 자속밀도의 고조파 항은 무시하였다.

식(1)~(4)을 통해 나타난 공극 자속밀도 식을 Maxwell stress tensor 식에 대입하여 정리하면 다음과 같이 방사 방향

전자기 응력,  $P_r$ 을 계산할 수 있다.

$$P_r = \frac{B_r^2 - B_t^2}{2\mu_0} \approx \frac{B_r^2}{2\mu_0} = \frac{(B_{r\_PM} + B_{r\_Arm})^2}{2\mu_0} \times \lambda_g^2 \\ = \left[ \sum_{\mu} B_{\mu} \cos(\mu p \theta - \mu p \omega_r t) + \sum_v B_v \cos(s_v v N_t \theta - p \omega_r t + \phi_v) \right]^2 \times \frac{\left[ \lambda_0 + \sum_k \lambda_k \cos(k s \theta) \right]^2}{2\mu_0} \quad (5)$$

여기서  $\mu_0$ 는 진공 투자율,  $B_r$ 는 부하시 영구자석 동기모터의 접선방향 공극 자속밀도를 나타내며  $B_t$ 는 일반적으로  $B_r$ 에 비해 그 크기가 훨씬 작기 때문에 무시하였다. 식(5)를 통해 구한 방사 방향 전자기 응력의 각 성분 별 force order 및 주파수를 Table II에 나타내었다. 이때 고정자 슬롯 효과의 제곱항은 크기가 작다고 가정하여 무시하였다. Table II에서 알 수 있듯, 전자기 응력의 force order은 0차 또는 최저차 force order의 배수 성분으로 나타나고 주파수는  $2f_e$ 에서 지배적임을 알 수 있다. 이를 전자계 시뮬레이션으로 확인하기 위해 Fig. 1에 나타낸 대상 모터의 전자기 응력 Two dimensional(2D) Fast Fourier transform(FFT) 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 앞서 예측했던 대로 force order는 최저차 성분의 배수로 나타나며, 주파수는  $2f_e$ 에서 크기가 가장 큰 것을 알 수 있다. (3)과 같이 정현파 전류인가시 전기자에 의한 공극 자속밀도는 시간고조파성분이 존재하지 않기 때문에,  $2f_e$  이외의 주파수는 영구자석의 공극 자속밀도 고조파 성분에 의해서만 발생하기 때문에 force order는 극 수 차수의 배수인  $2np$ , 고조파는  $2nf_e$ 에서 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이때 고정자에 작용하는 force order와 변형량의 관계는 아래와 같이 표현될 수 있다[5].

$$Y_{m=0} = \frac{R_y R \times FM_{m=0}}{E \times T_y} \quad (6)$$

$$Y_{m \geq 2} = \frac{12R_y^3 R \times FM_{m \geq 2}}{E \times T_y^3 (m^2 - 1)^2} \quad (7)$$

여기서  $Y$ 는 변형량,  $m$ 은 force order,  $R_y$ 는 고정자 요크의 평균 반경,  $R$ 은 고정자의 내반경,  $T_y$ 는 요크의 반경 방향 두께,  $FM$ 은 특정 force order의 힘 크기,  $E$ 는 영률을 나타낸다.

Table II. Source, force order, and frequency of radial force.

Source	Force order	Frequency
PM field	$(\mu_1 \pm \mu_2)p$	$(\mu_1 \pm \mu_2)f_e$
Armature reaction	$(v_1 \pm v_2)N_t$	$2f_e$
PM field and armature reaction	$\mu p \pm v N_t$	$f_e(\mu \pm 1)$
PM field and stator slotting	$(\mu_1 \pm \mu_2)p \pm ks$	$(\mu_1 \pm \mu_2)f_e$
Armature reaction and stator slotting	$(v_1 \pm v_2)N_t \pm ks$	$2f_e$
PM field and armature reaction and stator slotting	$\mu p \pm v N_t \pm ks$	$f_e(\mu \pm 1)$

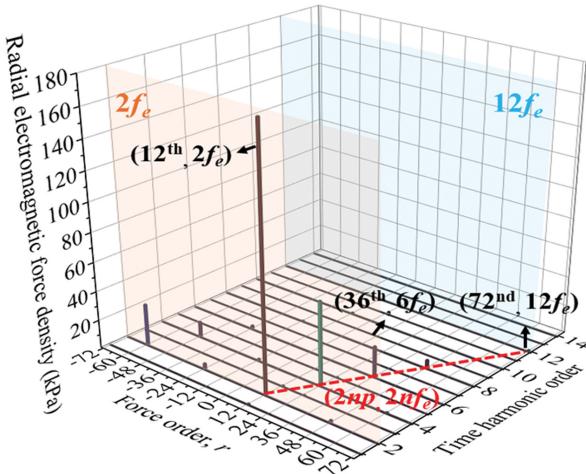


Fig. 2. (Color online) 2D FFT results of radial electromagnetic force under rated load.

따라서 식(7)을 통해 알 수 있듯이, force order가 낮을수록 고정자의 변형량은 크게 증가하므로 기존의 많은 진동 연구들은 최저차 force order를 주요 분석 대상으로 삼아왔다. 한편 식(6)에서 나타나는 0차 force order의 변형량은 최저차 force order가 클 경우 그 영향이 상대적으로 커질 수 있으나, Fig. 2에서 확인되는 바와 같이 일반적으로 그 크기가 작아 기존 연구에서는 무시되어 왔다. 그러나 본 연구에서는 치변조 효과에 의해 0차 force order 성분이 증폭될 수 있음을 보이며, 이로 인해 분포권 모터의 진동 특성에 유의한 영향을 미칠 수 있음을 제시한다.

### III. 치변조 효과

집중힘은 Fig. 3과 같이 모터의 가진력을 고정자에 인가하기 위해 분포된 힘을 치중심을 기준으로 합력으로 변환하여 인가하는 방법으로, 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$F_{r,z} = RL_{stk} \int_{\theta_z - \pi(1-\beta)/s}^{\theta_z + \pi(1-\beta)/s} \{P_r \cos(\theta_z - \theta) + P_t \sin(\theta_z - \theta)\} d\theta \quad (8)$$

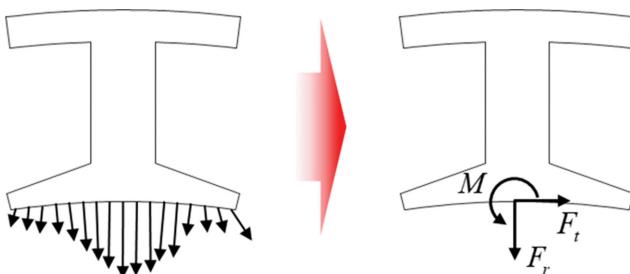


Fig. 3. (Color online) Distributed electromagnetic force and corresponding concentrated force and moment.

$$F_{t,z} = RL_{stk} \int_{\theta_z - \pi(1-\beta)/s}^{\theta_z + \pi(1-\beta)/s} \{P_t \cos(\theta_z - \theta) - P_r \sin(\theta_z - \theta)\} d\theta \quad (9)$$

$$M_z = R^2 L_{stk} \int_{\theta_z - \pi(1-\beta)/s}^{\theta_z + \pi(1-\beta)/s} P_r \sin(\theta_z - \theta) d\theta \quad (10)$$

여기서  $F_t$ 과  $F_r$ 은 방사방향과 접선방향 집중힘,  $M_z$ 은 모멘트,  $L_{stk}$ 은 적층길이,  $\theta_z$ 는 z번째 치 중심의 기계적 각도,  $\beta$ 는 슬롯의 pitch,  $P_r$ 은 접선방향 공극 전자기 응력으로 아래와 같이 표현된다.

$$P_r = \frac{B_r B_t}{\mu_0} \quad (11)$$

여기서  $B_r$ 는 부하시 영구자석 동기모터의 접선 방향 공극 자속밀도이다.

집중힘은 치중심에 인가되고 이로 인한 응답(가속도, 변형량 등)은 고정자의 외경에서 측정된다. 따라서 힘의 작용점과 응답의 측정점의 거리가 멀므로 생브낭의 원리에 따라 집중힘과 분포힘의 응답 차이는 미소하다고 볼 수 있다.

고정자 내경측 공극에 일정한 작은 각도 간격으로 분포되어 있는 힘을 각 치의 중심에 집중힘으로 변환할 시 샘플링 점이 급격하게 줄어드는데 이로 인해 고차 고조파가 저차 고조파로 변조되는 효과를 치변조 효과라고 한다. 샘플링 점이 줄어들에 따라 치변조 효과가 나타나는 원인은 손실 없이 신호를 모사하기 위해선 신호의 주파수 두배 이상에 해당하는 샘플링 주파수가 필요하다는 Nyquist sampling 이론으로 설명 가능하며 고차 고조파가 저차고조파로 변조되는 수식적 관계는 다음과 같다.

$$f^r = f^{r'} \cos[(|h| - ks)\theta + \omega^r t + \beta^r] \quad (12)$$

이때  $f^r$ 은 변조전의 가진력,  $f^{r'}$ 은 변조후의 가진력,  $\omega^r$ 와  $\beta^r$ 는 변조전 가진력의 각속도와 위상을 나타낸다.

이러한 치변조 효과로 인해 슬롯 수가 비교적 적은 치집중권 모터에서는 고차 force order, 특히 크기가 큰 극 수 차수의 force order가 최저차로 변조됨에 따라 고차 force order의 영향을 무시할 수 없게 되었다. 대상 모터와 같은 분포권 모터는 슬롯 수가 고차 force order를 충분히 반영할 수 있을 정도로 많기 때문에 최저차 force order로 변조되는 고차 force order의 크기가 작아 치변조 효과로 인한 최저차 force order 증폭은 미미하다. 하지만 Fig. 4와 같이 슬롯 차수( $s$ )에 해당하는 force order의 경우 치변조 효과에 의해 0차로 변조된다. 식(6), (7)에 의해 0차 force order는 대상 모터와 같이 12극 72슬롯의 최저차 force order가 12로 높은 경우 그 영향을 무시하기 어렵다. 게다가 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 슬롯 차수( $s$ )에 해당하는 force order는  $(s/p)f_e$

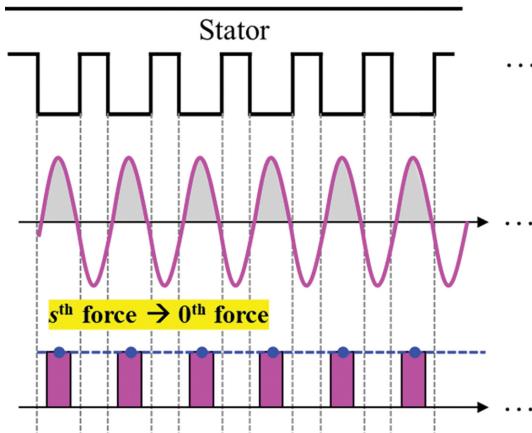


Fig. 4. (Color online) Tooth modulation effect of the  $s^{\text{th}}$  order force into the  $0^{\text{th}}$  order force in a distributed winding motor.

주파수, 즉 기계적으로 슬롯 주파수에서 나타나므로 공진에 대한 영향을 받기 쉽다.

#### IV. 치 변조 효과를 고려한 대상 모터 진동 분석

본 장에서는 대상 모터인 12극 72슬롯 자속 집중형 모터에 치 변조 효과를 고려한 진동 분석을 진행하여 0차 force order로 변조되는 영향도를 분석한다. Fig. 5는 정격 부하에서 전자계 2D FEA 통해 구한 force order가 72, 주파수가  $12f_e$ 에서의 분포함과 집중함을 나타낸다. 결과적으로 Fig. 4와 같이 슬롯 차수에 해당하는 force order가 치변조 효과에 의해 0차로 변조되는 것을 확인할 수 있다.

Table III은 대상 모터의 모달 해석의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 모달 해석시 고정자 권선의 질량은 고정자 치에 반영되었으며, 하우징은 무시한다는 조건으로 해석되었다. 이때 4mode 부터 11mode는 가진원의 주파수 대역과 멀고, Mode shape 또한 주요 force order와 다르므로 생략하였다. 대상 모터의 주요 force order는 최저차 order인 12의 배수 또는

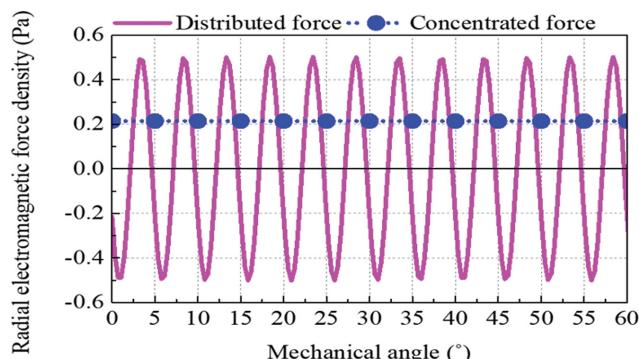


Fig. 5. (Color online) Modulation of the  $72^{\text{th}}$  order force into the  $0^{\text{th}}$  order force caused by the tooth modulation effect in the 2D FEA.

Table III. Mode analysis results of the target motor.

Mode	Mode shape	Frequency
0		3,451.9 Hz
2		193.4 Hz
3		529.2 Hz
12		5,051.3 Hz

0차이다. 하지만 12mode의 공진 주파수는 5,051.3 Hz로 최저차 force order가 큰  $2f_e$ 가 12mode의 공진 주파수 근처 대역과 일치하기는 어렵다. 0mode의 공진 주파수 또한 3451.9 Hz로 높은 주파수 대역에 위치하나, 0차 force order가 큰 주파수가  $(s/p)f_e$ 이므로 공진 주파수 대역에 유의해야 한다. Fig. 6은 정격 부하에서 대상 모터의 정격 속도 1,800 rpm과 2,880 rpm에서의 주파수별 최대 방사 방향 변형량을

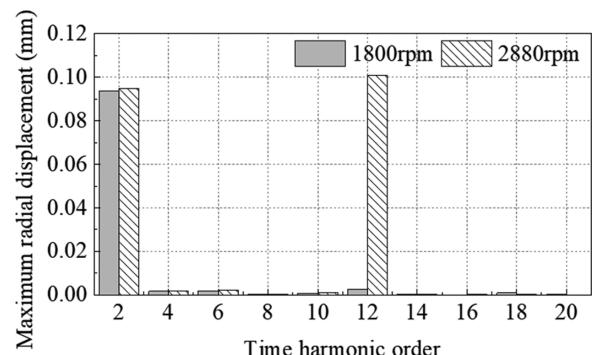


Fig. 6. Maximum radial deformation by frequency of the target motor under rated load.

나타내었다. 정격 속도에서는 최저차 force order에 대한 영향이 지배적인  $2f_e$ 에서의 진동이 다른 주파수에 비해 월등히 큰 것으로 나타났다. 하지만 2,880 rpm은  $(s/p)f_e$ 가 3,456 Hz로 0mode 공진 주파수 대역과 일치하여 0차 force order가 지배적으로 작용하는  $(s/p)f_e$ 가  $2f_e$ 보다 더 큰 진동을 유발하는 것으로 확인되었다.

## V. 결 론

본 연구에서는 정수 슬롯 분포권 영구자석 동기모터의 진동 특성을 규명하기 위해 슬롯 고조파에 의한 치변조 효과를 분석하였다. 전통적으로 분포권 모터의 진동 해석은 최저차 force order가 지배적이라고 알려져 왔으나, 본 연구 결과 슬롯 차수 force order가 치변조 효과에 의해 0차 force order로 변조되어 모터 진동에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 특히, 12극 72슬롯 자속집중형 모터의 변형량 해석 결과, 정격 속도 조건에서는  $2f_e$  성분이 우세하게 나타났지만, 특정 운전 속도(2,880 rpm)에서는  $(s/p)f_e$ 인 기계적으로 슬롯 주파수 성분이 0모드 공진 주파수와 일치하여 0차 force order가 지배적인 진동을 유발하였다. 이는 기존 연구에서 간과되었던 0차 force order의 중요성을 명확히 보여주며 자속집중형 모터에도 치변조 효과에 대한 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 분포권 PMSM의 저소음·저진동 설계를 위해서는 최저차 force order뿐만 아니라 슬롯 고조파와 치변조 효과로 인해 발생하는 0차 force order까지 고려해야 한다.

본 연구에서는  $(s/p)\omega$  6일때의 모터에 한해서 분석이 진행

되었다. 본 논문의 결과와 같이 0차 force order에 의해  $(s/p)f_e$ 의 크기가 커져 이 주파수에서의 공진영향을 분석하는 것이 중요하다. 따라서 향후 연구계획으로는 다양한 극 슬롯 조합과  $(s/p)$ 에 따른 0차 force order에 대한 변형량 영향을 비교 분석할 예정이다.

이러한 연구는 이러한 새로운 진동 원인 규명을 통해 향후 산업용 및 차량용 모터의 NVH 특성 개선을 위한 기초 설계 지침을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 에너지 수요관리핵심기술개발사업으로 수행된 연구임(No. RS-2023-00232593, 중형급 산업용 전동기 공통 기반기술 개발).

## References

- [1] X. Li, S. Huang, Q. Zhang, and Y. Dai, IEEE Int. Conf. Elect. Mach. Syst. **17**, 1552 (2015).
- [2] M. Valavi, J. Le Besnerais, and A. Nysveen, IEEE Trans. Magn. **52**, 8107206 (2016).
- [3] S. Wang, J. Hong, Y. Sun, and H. Cao, IEEE Trans. Ind. Electron. **67**, 2954 (2020).
- [4] F. Lin, S. Zuo, W. Deng, and S. Wu, IEEE Trans. Ind. Electron. **63**, 7455 (2016).
- [5] A. Cassat, et al., IEEE Trans. Ind. Appl. **48**, 1526 (2012).
- [6] J. Kim, S. Park, J. Ryu, and M. Lim, IEEE Trans. Ind. Electron. **70**, 4007 (2023).